

## バイポーラ型固体撮像素子の設計論

著者	中村 佳夫
号	1253
発行年	1991
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10060">http://hdl.handle.net/10097/10060</a>

氏 名	中 村 佳 夫
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 4 年 2 月 12 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 48 年 3 月 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程 電気工学専攻修了
学 位 論 文 題 目	バイポーラ型固体撮像素子の設計論
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大見 忠弘      東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 樋口 龍雄      東北大学助教授 柴田 直

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

1970年, W.S.Boyle と G.E.Smith によって発明された CCD (Charge Coupled Device) は, 近年 8mm ビデオ・カメラ, 複写機及びファクシミリ等に固体撮像素子として使用され新しい市場を開拓するに至っている。このように, 成功を収めている CCD に対しても, HDTV (High Definition Television) 次代の到来に向けて, 更に高性能化のための研究・開発が精力的に進められている。しかしながら, 画素の小面積化に伴う性能劣化の課題に直面している。固体撮像素子の高性能化とは, (1) 高感度化, (2) 優れた直線性, (3) 高 S/N 比化, (4) 高帯域化の 4 点に集約される。これらは, 応用システムの要求する使用範囲で十分広いダイナミック・レンジを確保しなければならないことを意味している。

1983年, 大見, 田中によって, 上記の課題を克服する可能性のある新ハイポーラ型固体撮像素子 (BASIS: Base-Stored Image Sensor) の提案がされた。この BASIS は, 容量負荷を持つハイポーラ・ホトトランジスタのエミッタ・ホワロを基本回路とし, 基本動作は①リセット動作, ②蓄積動作, ③読み出し動作の三段階で構成される。②蓄積動作及び③読み出し動作において, バイポーラトランジスタの三端子のうちベースとエミッタがフローティング状態となることが BASIS の特徴である。

本論文は, BASIS の基本動作の詳細な解析と, そこから導かれる固定パターン・ノイズ (FPN: Fixed Pattern Noise) の定式化, 及びランダム・ノイズの定式化を含む BASIS の設計論を確立し,

実際の設計に供することを目的として行われた研究の成果をまとめたものである。

## 第II章 BASISの動作解析

この章では、リセット動作、蓄積動作、及び読み出し動作の詳細な解析を行っている。

2段階で構成されるリセット動作の中のトランジェット・リセット動作の解析より次のことを明白にした。ベース電圧はトランジェット・リセット時間 $t_F$ で決まるある電圧に収束する。また収束する電圧は初期電圧に依存しない。即ち、トランジェット・リセット動作は、トランジェット・リセット動作の初期に電圧の不均一が複数の画素間に存在しても均一化する作用を有し、FPN低減効果を持つ。

順バイアス蓄積動作の解析より、光発生電圧 $V_p$ は光電流 $I_p$ と蓄積時間 $t_s$ に比例しベース・コレクタ接合容量 $C_{bc}$ に反比例することを明らかにした。また、ブートストラップ・ファクター $K_t$ を導いた。ブートストラップ効果は、ベース・エミッタ接合容量 $C_{be}$ によるエミッタからベースへの正帰還によって生ずることを明らかにした。

読み出し動作の解析より、エミッタに出力される電圧はベース電圧に読み出し電圧ゲイン $1/(1+D)$ を掛けた値となり、信号電圧を大きく取るためには破壊率 $D$ をできるだけ小さく、即ち、電流増幅率 $h_{FE}$ を大きく（3000以上）設計しなければならないことを明らかにした。また、読み出し特性は、読み出し時の順バイアス電圧と読み出し時間に依存し、順バイアス電圧が高い程読み出し時間を短くすることができることを示した。

光電変換特性において重要な直線正に関するリニアリティ・ファクター $\gamma$ を導いた。リアリティ・ファクター $\gamma$ とダイナミック・レンジとの間にはトレード・オフの関係があることを示し、最適化の指針を示した。

## 第III章 FPNの解析と検証

暗時のエミッタ電圧の不均一正、即ちFPNは、暗時のエミッタ電圧をホトトランジスタのデバイス・パラメータで全微分することによって得られる。解析の結果、トランジェット・リセット動作、蓄積動作、読み出し動作の各動作において発生するFPNを分離して定式化することに成功した。また、この解析より次のことが明らかとなった。

FPNは主として4つの不均一性の要因、即ち $(\delta h_{FE}/h_{FE})$ 、 $(\delta C_{bc}/C_{bc})$ 、 $(\delta C_{be}/C_{be})$ 、 $(\delta I_d/I_d)$ より発生することが明らかになった。ここで、 $I_d$ は暗電流である。また、FPNは破壊率 $D$ 及びブートストラップ・ファクター $K_t$ にも依存し、いずれも可能な限り小さく設計することが必要である。

暗時のエミッタ出力電圧 $V_{Ed}$ の実験データから、 $D$ 及び $K_t$ を抽出し計算値との比較を行った。また、感度対電流増幅率 $h_{FE}$ の特性において、実験値と計算値の比較を行った。その結果、両者の値は良く一致し、解析の有効性を確認した。

暗時のエミッタ出力電圧の不均一性 $\delta V_{Ed}$ の実験データから $(\delta h_{FE}/h_{FE})$ の値を見積もった。二通りの実験結果がほぼ一致しておりFPNの解析の有効性を確認した。実験による検証によって

解析の有効性を確認した上で、 $S/N$ 比の式を導いた。 $S/N$ 化の指針を導き、 $S/N$ 対デバイス・パラメータの不均一性の特性を具体的な数値を持って示した。また、FPNに関する現状と将来の考察を行った。現状では、画素サイズを大きくして高 $S/N$ 比を確保することが重要であり、将来、デバイス・パラメータの不均一性が改善された時点における画素サイズの小さいBASISの高 $S/N$ 比化の可能性を示した。

#### 第IV章 ランダム・ノイズの解析

ランダム・ノイズの解析に於て、キャリアの数に関する確率密度関数を導入して、BASISの基本動作において発生するランダム・ノイズの定式化に成功した。これによって、従来、周波数空間でのみ取り扱われていたランダム・ノイズを、時間空間で取扱う方法を確立した。

BASISのトランジェット・リセット動作、及び読み出し動作において発生するランダム・ノイズは、ショット・ノイズであることを明らかにした。トランジェット・リセット動作で発生するショット・ノイズは、結果的にサーマル・ノイズ(KTCノイズ)と全く同じ形になることを示した。このことは、トランジェット・リセット動作の初期に大きなランダム・ノイズが存在したとしても、トランジェット・リセット動作によってその大きなランダム・ノイズが低減され、最終的にはサーマル・ノイズに収束することを示している。これは、第II章で記述したFPN低減効果と合わせて、BASISのトランジェット・リセット動作の最大の特徴と云える。

トランジェット・リセット動作及び読み出し動作に於けるランダム・ノイズの値を試作したTEG (Test Element Group)を用いて実験的に求め、実験結果と計算値との比較検証を行った。その結果、両者は良く一致し理論解析の有効性が確認された。

読み出し動作で発生するランダム・ノイズ即ちショット・ノイズを低減させるためには、電流増幅率 $h_{FE}$ をできるだけ大きく(3000以上)設計・制作することが重要であることを示した。

等価ランダム・ノイズ電圧源を含むBASISの読み出し動作における等価回路を提案した。この等価回路は、ベース及びエミッタがフローティングで使用されるエミッタ・ホロウ回路にも一般論として適用可能である。

$S/N$ 比に関する定式化を行い、ランダム・ノイズに対する $S/N$ 比の向上の指針を導いた。この $S/N$ 比の向上の指針は第III章でのFPNに関する指針と全く同じであり、BASISの設計法が確立されたことになる。

#### 第V章 BASISの設計論

この章では、第II章から第IV章までの議論より、高 $S/N$ 比化の観点から設計に関する重要な項目を抽出してまとめている。次に重要な項目の概要を記述する。

(1) トランジェット・リセット動作の効果を十分引き出すには、ベース・エミッタ間の初期バイアス電圧を0.6V以上に設定し、トランジェット・リセット時間を数 $\mu\text{sec}$ ～数10 $\mu\text{sec}$ にする必要がある。

(2) 蓄積動作に於ては、光発生電圧 $V_p$ がベース・コレクタ間容量 $C_{bc}$ に反比例することから、ベ-

ス・コレクタ間容量 $C_{bc}$ を小さく設計しなければならない。

(3) 蓄積動作では、暗電流がゼロでもエミッタ出力電圧が発生し、ベース・エミッタ間容量 $C_{be}$ による正帰還によってブートストラップ効果が働くために、ベース及びエミッタ電圧が上昇する。この効果は、FPN及びダンダム・ノイズも増大させるため、ブートストラップ・ファクター $K_t$ を小さく設計しなければならない。

(4) 読み出し動作においては、読み出しの順バイアス電圧を適正な値に設定すると、リニアリティとダイナミック・レンジを十分に保証することができる。このためには、読み出し時間 $t_R = 10^{-7} \sim 10^{-6}$  sec に於て、読み出し時の順バイアス電圧を実質的に与えるエミッタ・リセット電圧 $V_{ER}$ を0.4Vか0.4Vより若干高い電圧に設定する必要がある。

(5) FPNは、デバイス・パラメータの不均一性に起因する。現状では、 $\delta h_{FE}/h_{FE}$ が支配的であり3～6%もある。このような条件下では、画素サイズを数 $10\mu m$ 角以上に設計するか、回路技術によって低減させることが有効である。

(6) 読み出し動作に於て、信号電圧を低下させないで読み出すためと、読み出し時のランダム・ノイズを低減させるために、電流増幅率 $h_{FE}$ が3000以上あることが要求される。

また、本章では、ノイズ低減方式として差分方式によるノイズ補正回路と容量クランプ方式によるノイズ補正回路を示した。前者は、一つの画素に対して蓄積容量を二つ設け、リセット直後のホトトランジスタの出力を一方の蓄積容量に蓄え、蓄積動作後の出力を他方の蓄積容量に蓄えて最終的に差動増幅器によって差を取り、ノイズを低減する方法である。この方法は非常に有効であり現在幾つかのイメージ・センサに於て実用化されている。後者は、ホトトランジスタのエミッタと蓄積容量の間に直列に容量を接続して、蓄積容量にはエミッタ電圧の変化分のみを取り出せるようにしたものである。即ち、直流成分を遮断することによりノイズを低減する方法である。この回路は、まだ実用になっていないがシミュレーションによってその有効性が確認された。

以上の議論によって、BASISの設計論が確立された。

## 第VI章 BASISの応用

第II章より第V章で確立され設計論を適用して開発した、オートフォーカス（AF）一眼レフ・カメラ用AFセンサを二例、イメージ・スキャナ用等倍センサ及び130万画素エリア・センサの特性の概略を示した。本設計論の適用の結果、十分実用に供せる特性が得られ、本設計論の有効性が確認された。

## 第VII章 結 論

本論文は、バイポーラ型固体撮像素子BASISに関して詳細な解析を行い、高S/N比化の可能性を追求し、この解析を基礎としBASISの設計論を確立することを目的とした研究の成果をまとめたものである。

解析の結果、増幅型固体撮像素子には、主に増幅を行うトランジスタの増幅率の不均一性によるFPNと、増幅機構そのものに起因するショット・ノイズが存在することを明らかにした。この解

析により確立された設計論に基づいて BASIS のノイズを低減させる具体的な方法を示した。この成果によって、増幅型固体撮像素子における技術的課題とその解決方法及び今後の高性能化への方向を明確にした。

現在、CCD がいろいろな応用分野で採用され活躍している。序論で述べたように HDTV などの高密度・高品位のシステム応用に対しては、画素サイズの微細化に伴って CCD の  $S/N$  比の劣化が大きな課題になっている。その課題を解決する可能性を有するデバイスとして、増幅型固体撮像素子が有力な候補であることは間違いない。

各種の増幅型固体撮像素子の開発に於いても、本研究で確立された設計論は有効であり、本論文に記述された内容が増幅型固体撮像素子の研究者にとって有用なものであると信ずる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

高品位テレビジョン時代を迎えて、高性能増幅型固体撮像素子の開発が強く要求されている。これまでも、増幅型固体撮像素子の提案はなされていたが、固定パターン雑音が大きく実用には至っていない。

本論文は、容量負荷エミッタホワロ形式に構成されたバイポーラ型固体撮像素子（BASIS:Base-Stored Image Sensor）の詳細な解析に基づき、固定パターン雑音及びランダム雑音を十分低く抑えて、高感度で微弱光領域でも動作しうる、広いダイナミックレンジを有する BASIS の設計論を確立し、この設計論に基づき各種リニアセンサ及びエリアセンサを実用化した研究の成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、リセット、蓄積、読み出しと続く BASIS の動作特性とデバイスパラメータの関係を明確にしている。

第3章では、固定パターン雑音を記述する解析式を導出し、実験結果との比較から、本解析法の正当性を示し、固定パターン雑音を低減する方式を明らかにしている。すなわち、バイポーラトランジスタの電流利得を大きくし、ベースコレクタ間容量及びベースエミッタ間容量を小さくするとともに、それらの変動分を可能な限り小さくすれば、固定パターン雑音が減少することを示している。これは、重要な知見である。

第4章では、ランダム雑音の定式化から、バイポーラトランジスタのショット雑音が主要な雑音源であること、及びこのショット雑音が BASIS では熱雑音に収束することを明らかにしている。同時に、ランダム雑音低減の方針が、固定パターン雑音低減とまったく一致することを明らかにした。これは、増幅型固体撮像素子実用化の決め手となった成果である。

第5章は、非破壊読み出しが可能な BASIS の雑音をより一層低減させるため、差分方式及び容量クランプ方式の補正回路を外部回路に導入した BASIS の設計論について述べている。この設計論は、固定パターン雑音やランダム雑音を十分低く抑え増幅型固体撮像素子を実用化させた重要な成果である。

第6章は、この設計論に基づき開発されたカメラ及びファクシミリ用リニアセンサ及びスチールビデオ用130万画素子エリアセンサについて述べている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、高感度で微弱光領域でも十分使用しうる、広いダイナミックレンジをもつ増幅型固体撮像素子の設計論を確立し、その有用性を実証した研究の成果をまとめたもので、半導体電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。